

变压器油浸纸电气参数分区反演优化算法

谢一鸣¹, 金 硕², 阮江军³, 吴兴旺¹, 杨海涛¹, 吴 杰¹,
胡啸宇¹, 吴 昊¹

(1. 国网安徽省电力有限公司电力科学研究院, 合肥 230022; 2. 湖北工业大学太阳能高效利用及储能运行控制湖北省重点实验室, 武汉 430068; 3. 武汉大学电气与自动化学院, 武汉 430072)

摘要: 在运变压器内油浸纸的老化和受潮状态具有空间上的分布特性,但目前的评估方法仅限于评估绝缘的整体状况,无法检测变压器内油浸纸局部区域的绝缘状况。文中为考虑局部绝缘问题,借鉴反演思想,以油浸纸材料电气参数(电阻率和低频相对介电常数)为直接特征量,提出基于有限元电场仿真技术的变压器油浸纸电气参数分区反演计算方法,获取局部区域电气参数。针对反演算法,提出NDM-Broyden法以改进原算法NRM的计算效率。最后通过XY模型对反演结果进行验证,试验结果表明,采用该方法可有效反演出XY模型不同区域油浸纸板的电阻率和低频相对介电常数,进而为判断变压器局部油浸纸的老化和受潮状态提供参考和新思路。

关键词: 油浸纸; 电阻率; 低频相对介电常数; 反演; XY模型

Multi-regional Inverse Optimization Algorithm for Electrical Parameters of Oil-immersed Paper of Transformer

XIE Yiming¹, JIN Shuo², RUAN Jiangjun³, WU Xingwang¹, YANG Haitao¹, WU Jie¹,
HU Xiaoyu¹, WU Hao¹

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Anhui Electric Power Company, Hefei 230022, China; 2. Hubei Key Laboratory for High-efficiency Utilization of Solar Energy and Operation Control of Energy Storage System, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China; 3. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The ageing and moisture state of oil-immersed paper in the transformer have spatial distribution characteristics, but the current assessment method has no way to detect the insulation condition of partial area of the oil-immersed paper inside the transformer but is only limited to the assessment of the overall insulation condition. For considering partial insulation issue and with reference of inversion idea in this paper, the electrical parameters (resistivity and low-frequency relative permittivity) of the oil impregnated paper is taken as the direct characteristic quantities, and an inversion method of electrical parameters of multi-regional oil-immersed paper of transformer based on finite element electric field simulation technology is proposed to obtain the electrical parameters of partial region. As for the inversion algorithm, the NDM-Broyden method is proposed to improve the computational efficiency of the original algorithm NRM. Finally, the inversion results are verified by XY model. The tests results show that the adoption of this method can effectively inverse the resistivity and low-frequency relative permittivity of the oil-immersed paper in different areas of XY model, thus providing a reference and new idea for judging the ageing and moisture state of partial oil-immersed paper in transformer.

Key words: oil-immersed paper; resistivity; low-frequency relative permittivity; inversion; XY model

0 引言

油浸式电力变压器是电网中应用最为广泛的

电力变压器。油浸式变压器内绝缘为油纸绝缘,其在运行中长期承受热、电、化学和机械应力,导致油纸绝缘发生老化^[1]。据国际大电网委员会CIGRE统

收稿日期:2023-03-20; 修回日期:2023-05-27

基金项目:安徽省自然科学基金资助(2208085UD18)。

Project Supported by the Anhui Natural Science Foundation (2208085UD18).

计,在1996年至2010年21个国家的964次变压器故障数据中,除未知原因外,老化引起的故障率位列第一^[2],及早发现绝缘老化问题可以提高电网运行的安全性、可靠性与经济性^[3]。在变压器油纸绝缘中,绝缘油具有流动性,绝缘状态分布相对均匀,且取样方便,绝缘状态易检测。当变压器油老化严重,可通过换油的方式改善其绝缘性能。而作为固体绝缘的油浸纸、油浸纸板,其老化状态呈现空间分布性^[4],且存在取样困难、难以替换的问题。一旦发生劣化,其绝缘、机械等方面的性能无法恢复。因此油浸纸的老化程度决定了变压器运行的可靠性与寿命^[1]。

目前的油浸纸绝缘状态评估方法多基于绝缘材料劣化后理化参数与绝缘状态的关系,如纸聚合度、油中糠醛含量、油中溶解气体分析(dissolved gas analysis, DGA),但聚合度的测量过程涉及直接采样,具有破坏性,同时油中溶解产物经滤油、换油后浓度降低,影响评估结果;随着测量技术的发展,基于介电响应的无损测量方式被广泛应用于变压器油纸绝缘的状态评估,如频域介电频谱法(frequency domain dielectric spectroscopy, FDS)^[5-6]。变压器运行时油纸绝缘处于不均匀电场和不断变化的温度环境中,其老化和受潮状态具有明显的空间分布特征,而目前的评估手段主要用于评估整体绝缘状态^[7],可能会掩盖局部的绝缘信息。

目前的变压器油纸绝缘评估方法相较于传统的预防性试验有很大进步,但尚无统一的评估特征参量,且未能考虑老化部位的分散性。针对这一问题,文[8-10]分别以油浸纸材料参数——电阻率为老化特征量,将变压器端口可测参数稳态绝缘电阻和低频介质损耗因数作为输入量,利用反演思想并借助有限元电场仿真技术,采用牛顿—拉夫逊法(Newton-Raphson method, NRM)和智能算法实现了变压器内部不同区域油浸纸电阻率的反演计算,文[11]通过配电变压器试验初步验证了反演思想的可行性。针对牛顿法受电阻率初值影响较大的问题,文[12]引入牛顿下山法(Newton downhill method, NDM)对NRM进行了改进。但老化和水分对电阻率会产生相似影响,单独反演电阻率势必无法区分油浸纸老化和受潮状态。而相关试验表明:老化和水分对低频相对介电常数的影响程度是不同的^[13],可以利用低频相对介电常数区分老化和水分的影响,继而修正水分对电阻率的影响。

综上,文中借鉴电阻率反演思路,以油浸纸电气参数电阻率、低频相对介电常数为老化和受潮特征量,端口可测量绝缘电阻、低频介质损耗因数以

及油的电气参数为输入量,建立一整套完整的变压器内油浸纸电气参数分区反演方法,同时采用Broyden法对原有反演算法的计算效率进行改进。最后搭建由不同老化和受潮状态油浸纸板组成的XY模型,对反演方法进行验证。研究结果为变压器局部区域油浸纸的绝缘状态评估提供一种新的思路和方法。

1 变压器油浸纸电阻率分区反演

1.1 电阻率反演数学模型

描述物理模型的某些参量可能无法直接通过外部测量得到,为了获得这些不可直接测量的信息,需要利用与这些不可测量有密切关系的可测量对其进行推断,这就是反演^[14]。

而在变压器油浸纸老化状态评估过程中,直接获得油浸纸的老化状态非常困难,需要变压器停运吊芯,具有破坏性,且油浸纸老化分布不均匀,要准确探测老化部位,需要大量重复性测量,耗时费力,准确性低。而通过反演方式对变压器内部油浸纸老化特征量电阻率 ρ 进行计算可为解决这一问题提供新思路。通过有限元电场仿真可在变压器内部油浸纸老化特征量 ρ 、油的电阻率 ρ_{oil} 和外部可测量绝缘电阻 R 之间建立固定的非线性映射关系 $F(\cdot)$

$$R = F(\rho, \rho_{oil}) \quad (1)$$

通常, ρ_{oil} 和 R 均可以通过外部测量获得,因此 ρ_{oil} 、 R 都是已知的。类比式(1), R 即为反演油浸纸 ρ 的端口可测参量,即反演输入量。反演 ρ 的基础是获得 R 的数值模拟过程或计算方法,之后即可将问题转化成使 R 模拟值和测量值之间误差范数最小的优化问题。而 $F(\cdot)$ 在实际中难以获得,可基于电磁场原理,借助有限元法建立,即对变压器油纸绝缘结构进行有限元建模,通过恒定电场仿真建立变压器端口参数 R 的计算方法或正演模型。

由于变压器运行时内部各区域的温度、电场等环境条件各不相同,造成油浸纸的老化呈现空间分布性。老化一般发生在油纸绝缘系统的局部区域,将其视为整体考虑会对评估结果造成“平均效应”,掩盖局部问题。因此,可以将一定范围内的油浸纸视为同一区域,将整个油纸绝缘划分为若干有限区域,同一区域内油浸纸的平均电阻率视为特征量,减少“平均效应”对评估结果的影响。

$$\begin{cases} F_1(\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_N) = F_1(\rho) = R_1 \\ F_2(\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_N) = F_2(\rho) = R_2 \\ \vdots \\ F_N(\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_N) = F_N(\rho) = R_N \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中: $\rho=(\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_N)^T$ 表示 N 个不同区域油浸纸的电阻率向量; $R_1, R_2, \dots, R_N$ 表示 N 个不同的端口绝缘电阻, 可通过对变压器不同端口间施加直流电压测量获得; $F_1(\cdot), F_2(\cdot), \dots, F_N(\cdot)$ 为两者之间的有限元恒定电场仿真过程或由恒定电场仿真建立起的映射关系。将变压器内部油浸纸划分为 N 个区域, 当绝缘油的电阻率已知时, 由于涉及直流问题, 可以采用有限元恒定电场仿真建立起如式(2)的非线性方程组。

采用某种数值方法求解式(2)中的方程组, 即可获得不同区域油浸纸的电阻率 $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_N$ 。

1.2 反演算法——NRM和NDM

在非线性方程求根的方法中, 迭代法收敛速度快, 适用于高维复杂计算。在以往的研究^[8-9]中, 作者采用迭代法中收敛速度快的 NRM 作为反演算法。NRM 虽然收敛速度较快, 但求解过程中误差范数也存在一定的波动, 若初值选择不合适可能会造成波动过大, 从而增加迭代步数, 甚至造成结果发散。为了减少初值的影响, 可采用 NDM 对 NRM 进行改进^[12]。现简述 NRM 和 NDM 的原理。

1.2.1 NRM 原理

对于式(2)中的方程组, 首先设置 ρ 的初值 $\rho_0=(\rho_{10}, \rho_{20}, \dots, \rho_{N0})^T$, 将方程组在 ρ_0 处按照二阶泰勒级数展开

$$\begin{cases} F_1(\rho_0) + \sum_{i=1}^N \frac{\partial F_1(\rho_0)}{\partial \rho_i} (\rho_i - \rho_{i0}) \approx R_1 \\ F_2(\rho_0) + \sum_{i=1}^N \frac{\partial F_2(\rho_0)}{\partial \rho_i} (\rho_i - \rho_{i0}) \approx R_2 \\ \vdots \\ F_N(\rho_0) + \sum_{i=1}^N \frac{\partial F_N(\rho_0)}{\partial \rho_i} (\rho_i - \rho_{i0}) \approx R_N \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中, $F_1(\rho_0), F_2(\rho_0), \dots, F_N(\rho_0)$ 均为通过有限元恒定电场仿真得到的、对应初值 ρ_0 的各端口绝缘电阻计算值。将式(3)写成向量形式

$$J_0 \times \Delta \rho_0 = \Delta R_0 \quad (4)$$

式(4)中, $\Delta \rho_0 = \rho - \rho_0$; $\Delta R_0 = R - F(\rho_0)$; J_0 被称为雅各比矩阵(Jacobian matrix), 即

$$J_0 = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1(\rho_0)}{\partial \rho_1} & \frac{\partial F_1(\rho_0)}{\partial \rho_2} & \dots & \frac{\partial F_1(\rho_0)}{\partial \rho_N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial F_N(\rho_0)}{\partial \rho_1} & \frac{\partial F_N(\rho_0)}{\partial \rho_2} & \dots & \frac{\partial F_N(\rho_0)}{\partial \rho_N} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式(5)中, 由于 $F_1(\cdot), F_2(\cdot), \dots, F_N(\cdot)$ 并不存在具体解析式, 即也不存在偏导数的解析式。文中按照偏导数定义, 采用式(6)计算各映射关系 $F_i(\cdot)$ 对各区域 ρ_{i0} 的偏导数, 即

$$\frac{\partial F_i(\rho_0)}{\partial \rho_i} = \frac{F_i(\rho_{10}, \dots, \rho_{i0} + \delta \rho, \dots, \rho_{N0}) - F_i(\rho_{10}, \dots, \rho_{i0}, \dots, \rho_{N0})}{\delta \rho} \quad (6)$$

$i = 1, 2, \dots, N$

式(6)中, $\delta \rho$ 为第 i 个区域电阻率 ρ_i 的偏增量。每计算一次偏导数, 就需要进行一次端口绝缘电阻正演计算。对于 $N \times N$ 的雅各比矩阵, 需要进行 N^2 次正演计算。

综上, ρ_1 可通过式(7)求得

$$\rho_1 = J_0^{-1} \times \Delta R_0 + \rho_0 \quad (7)$$

式(7)中, $\rho_1 = [\rho_{11}, \rho_{21}, \dots, \rho_{N1}]^T$ 为 ρ 经过第一次迭代所得到的电阻率列向量。

将式(7)推广至第 $(k+1)$ 次迭代

$$\rho_{k+1} = J_k^{-1} \times \Delta R_k + \rho_k \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (8)$$

通过式(8)对方程的初值 ρ_0 进行迭代修正, 直至第 $(k+1)$ 次迭代时的近似根 ρ_{k+1} 对应的绝缘电阻计算值 $F(\rho_{k+1})$ 与实际值 R 的误差范数 $\|E_{r(k+1)}\| = \|\Delta R_k\| = \|F(\rho_{k+1}) - R\| < s$, s 为终止误差, 此时 ρ_{k+1} 即为式(8)中的方程组的近似根, 这里误差范数 $\|E\|$ 为 2-范数, 即两个向量矩阵的直线距离。

1.2.2 NDM 原理

NDM 的基本原理是在迭代公式中引入下山因子 λ , 使每次迭代后的误差范数 $\|E_{r(k+1)}\|$ 始终小于上一次迭代的误差范数 $\|E_{r(k)}\|$, NDM 的迭代公式为

$$\rho_{k+1} = \lambda J_k^{-1} \times \Delta R_k + \rho_k \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (9)$$

NDM 求解多元非线性方程组的迭代流程如下:

- 1) 设置初始电阻率列向量 ρ_0 ;
- 2) 计算 $\|E_{r0}\|$ 并判断是否满足误差要求, 满足则结束迭代, 输出此刻对应的电阻率列向量, 若不满足继续下一步;
- 3) 取下山因子 $\lambda=1$, 计算雅克比矩阵 J_k ;
- 4) 计算 $\rho_{k+1} = \lambda J_k^{-1} \times \Delta R_k + \rho_k$;
- 5) 计算 $\|E_{r(k+1)}\|$, 并与 $\|E_{r(k)}\|$ 对比。① $\|E_{r(k+1)}\| < \|E_{r(k)}\|$, 判断 $\|E_{r(k+1)}\|$ 是否满足误差要求, 若不满足, 令 $\rho_k = \rho_{k+1}$, 并转至步骤 3), 若满足迭代结束; ② $\|E_{r(k+1)}\| \geq \|E_{r(k)}\|$, 令 $\lambda = \lambda/2$, 转至步骤 4) 重新求解 ρ_{k+1} 。

1.3 反演算法改进——NDM-Broyden 法

在 NRM 和 NDM 中, 雅各比矩阵 J 的求解往往占据大部分计算量, 根据式(6), 对于 $N \times N$ 的雅各比矩阵, 需要进行 N^2 次正演计算。Broyden 法属于拟牛顿法的一种。拟牛顿法的基本思想是用不包含二阶导数的矩阵 B_k 近似 NRM 和 NDM 中的雅各比矩阵 J_k , 从而减少计算量。

假设有矩阵 B_k 能近似 J_k , 使

$$\rho_{k+1} = B_k^{-1} \times \Delta R_k + \rho_k \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (10)$$

为防止每步都要重新计算 B_k , B_{k+1} 需要利用 B_k

加一个低秩的修正矩阵 ΔB_k 来获得

$$B_{k+1} = B_k + \Delta B_k \quad (11)$$

B_{k+1} 需要满足拟牛顿方程

$$B_{k+1}(\rho_{k+1} - \rho_k) = F(\rho_{k+1}) - F(\rho_k) \quad (12)$$

$$k = 0, 1, 2, \dots$$

而Broyden法就是用秩为1的修正矩阵 ΔB_k ,利用式(11)获得 B_{k+1} 。首先取合适的向量 $u_k, v_k \in R^n$,满足拟牛顿方程。令 $\Delta B_k = u_k v_k^T$, $d_k = \rho_{k+1} - \rho_k$, $\rho_k = F(\rho_{k+1}) - F(\rho_k)$,将这些代入式(11)和(12)得

$$u_k v_k^T d_k = \rho_k - B_k d_k \quad (13)$$

设内积 $v_k^T \times d_k \neq 0$,则

$$u_k = \frac{1}{v_k^T d_k} (p_k - B_k d_k) \quad (14)$$

将式(14)代入 $\Delta B_k = u_k v_k^T$,得

$$\Delta B_k = \frac{1}{v_k^T d_k} (p_k - B_k d_k) v_k^T \quad (15)$$

令 $v_k = d_k$,则有

$$\Delta B_k = \frac{1}{d_k^T d_k} (p_k - B_k d_k) d_k^T \quad (16)$$

将式(16)代入式(11)有

$$d_k^T d_{k+1} = B_k + \frac{1}{d_k^T d_k} (p_k - B_k d_k) d_k^T \quad (17)$$

到此,采用Broyden法时,仅第一步需要计算初始雅各比矩阵 J_0 ,并令 $J_0 = B_0$,之后的每一步只需通过上一步的结果按式(17)进行计算即可。因此,文中进一步利用Broyden法对NDM的计算效率进行改进,称为NDM-Broyden法,其电阻率迭代公式可写为

$$\rho_{k+1} = \lambda B_k^{-1} \times \Delta R_k + \rho_k \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (18)$$

在实际反演过程中,正演计算,即计算端口输入量如绝缘电阻的有限元仿真最为耗时,故文中以端口输入量的有限元计算次数为单位,比较NRM和NDM-Broyden法的计算量。

对于 $N \times N$ 的多元非线性方程组来说,采用NRM每次迭代均需进行 N 次有限元计算,同时除了最后一步迭代,每一次迭代在计算 $N \times N$ 的雅各比矩阵时,需要进行 N^2 次有限元计算,因此,采用NRM反演所需要的总有限元计算次数 T 为

$$T = N \times iter + N^2 \times (iter - 1) \quad (19)$$

式(19)中, $iter$ 为迭代次数。

改进后,由于NDM的每次修正需要进行 N 次有限元计算以判断计算值是否满足终止误差,修正中的每次迭代还需要计算一次雅各比矩阵,即 N^2 次有限元计算,而采用Broyden法在迭代过程中除了进行 N 次有限元计算外,只需要进行一次雅各比矩阵的运算。因此,NDM-Broyden法所需要的总有限元计算次数 T 为

$$T = N \times iter + N^2 + M_{iter} \times N^2 + M \times N \quad (20)$$

文中将在第三章通过仿真算例比较两种的算法在计算效率上的差异。

2 变压器油浸纸相对介电常数分区反演

2.1 油浸纸低频相对介电常数反演的意义

聚合度是判断油浸纸老化的重要判据^[15-16],油浸纸的老化,即聚合度的下降,会使其电阻率下降^[17]。文[18]试验结果表明,油浸纸电阻率与其聚合度之间有很强的相关性,存在较好的乘幂关系,可用电阻率表征油浸纸的老化状态。因此,电阻率可作为油浸纸老化状态评估的重要指标之一。值得注意的是,油浸纸的老化和受潮均会导致其电阻率下降,但这两种劣化状态反映在另一个材料参数——低频相对介电常数,则有所差异:水分对低频相对介电常数的影响远大于老化。文[19-20]提供的不同含水量以及不同老化阶段油浸纸低频相对介电常数的变化情况,试验结果表明水分对油浸纸低频介电常数的影响远大于老化对其的影响。文[21]中的试验也有相似结论。文中为验证文献研究结果,也进行了油浸纸板老化和吸湿实验^[3],在老化后测量不同聚合度下油浸纸样 10^{-4} Hz相对介电常数 ε ,简写成 $\varepsilon(10^{-4} \text{ Hz})$,见图1。可以发现, $\varepsilon(10^{-4} \text{ Hz})$ 受水分的影响远大于老化,在不同聚合度下油浸纸的 $\varepsilon(10^{-4} \text{ Hz})$ 随含水量变化曲线没有明显变化。

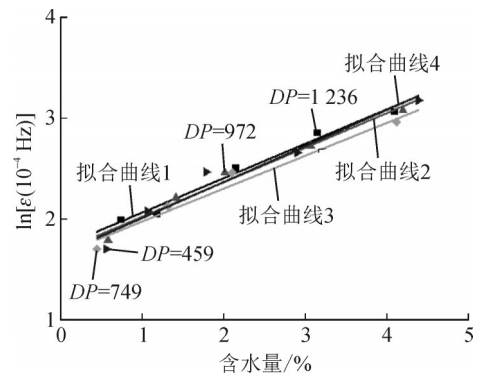


图1 不同聚合度下油浸纸 10^{-4} Hz相对介电常数 ε 与含水量的关系

Fig. 1 Relationship between oil-immersed paper ε at 10^{-4} Hz and moisture content under different DP

这一方面是由于水分为高介电常数的极性物质,含水量增加将导致油浸绝缘纸中单位体积内参与极化的分子数目增多,相对介电常数增加;另一方面随着含水量增加使其所含杂质离子数目增加,绝缘纸中可束缚电荷数目也增加,导致其相对介电常数增大。当油浸纸发生老化时,一方面纤维素直径下降,引起材料比表面积下降,可以吸附水分子

的羟基减少,吸湿能力减小。另外由于部分结晶区转化为无定型区,导致材料内部空隙增大,致使绝缘油分子大量进入孔隙中,挤占容纳水分子的空间,而绝缘油为非极性材料,其相对介电常数较低。故在油纸绝缘系统含水量一定的情况下,油浸纸的老化并不会造成其相对介电常数的大幅上升。

基于上述分析,在反演电阻率的基础上,进一步对低频相对介电常数 $\varepsilon(10^{-4} \text{ Hz})$ 进行反演有助于对其老化和受潮两种状态进行区分,弥补单纯以电阻率作为老化特征量会受水分影响的不足,更准确地把握绝缘状态,为变压器的运维决策提供更可靠的依据。

2.2 变压器油浸纸相对介电常数反演输入量

类比将直流情况下将变压器端口绝缘电阻作为反演电阻率的输入量,反演低频相对介电常数 $\varepsilon(10^{-4} \text{ Hz})$ 需在交流激励下进行。在低频交流电压激励 $U(\omega)$ 下,电介质的介质损耗因数 $\tan\delta(\omega)$ 不受绝缘结构的影响,与其相对介电常数 $\varepsilon(\omega)$ 密切相关,但同时也与电阻率 ρ 有关,其表达式为^[12]

$$\tan\delta(\omega) = \frac{1}{\omega\varepsilon_0\varepsilon(\omega)\rho} \quad (21)$$

式(21)中, $\varepsilon_0=8.85\times 10^{-12} \text{ F/m}$,为真空介电常数

因此,反演 $\varepsilon(10^{-4} \text{ Hz})$ 应采用与其频率相同的 $\tan\delta(10^{-4} \text{ Hz})$ 。同时,由于低频 $\tan\delta(\omega)$ 与其频率、电阻率和相对介电常数密切相关,在反演相对介电常数时,各区域油浸纸的电阻率也必须作为输入量,而电阻率可提前由反演计算获得。

与电阻率反演类似,若将变压器内部油浸纸划分为 N 个区域,角频率 $\omega=2\pi f$ 时,当变压器油电阻率 ρ_{oil} 、相对介电常数 $\varepsilon_{\text{oil}}(\omega)$ 已知,可以采用有限元时谐场仿真建立起各区域油浸纸电阻率 ρ 和相对介电常数 $\varepsilon(\omega)$ 到端口介质损耗因数 $\tan\delta(\omega)$ 之间的非线性映射关系

$$\begin{cases} H_1[\varepsilon_1(\omega), \varepsilon_2(\omega), \dots, \varepsilon_N(\omega), \rho_1, \rho_2, \dots, \rho_N] = \tan\delta_1(\omega) \\ H_2[\varepsilon_1(\omega), \varepsilon_2(\omega), \dots, \varepsilon_N(\omega), \rho_1, \rho_2, \dots, \rho_N] = \tan\delta_2(\omega) \\ \vdots \\ H_N[\varepsilon_1(\omega), \varepsilon_2(\omega), \dots, \varepsilon_N(\omega), \rho_1, \rho_2, \dots, \rho_N] = \tan\delta_N(\omega) \end{cases} \quad (22)$$

式(22)中: $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_N$ 表示 N 个不同区域油浸纸的电阻率; $\varepsilon_1(\omega), \varepsilon_2(\omega), \dots, \varepsilon_N(\omega)$ 表示 N 个不同区域油浸纸的 f Hz 相对介电常数; $\tan\delta_1(\omega), \tan\delta_2(\omega), \dots, \tan\delta_N(\omega)$ 表示 N 个不同的端口 f Hz 介质损耗因数,其可通过施加频率为 f 的交流电压测量获得; $H_1[\cdot], H_2[\cdot], \dots, H_N[\cdot]$ 为两者之间的有限元时谐场仿真过程或由时谐场仿真建立起的映射关系,在文中, $f=10^{-4} \text{ Hz}$ 为已知频率值。

由于油浸纸电阻率 $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_N$ 可由反演计算获得,式(22)可改写为

$$\begin{cases} H_1[\varepsilon_1(\omega), \varepsilon_2(\omega), \dots, \varepsilon_N(\omega)] = \tan\delta_1(\omega) \\ H_2[\varepsilon_1(\omega), \varepsilon_2(\omega), \dots, \varepsilon_N(\omega)] = \tan\delta_2(\omega) \\ \vdots \\ H_N[\varepsilon_1(\omega), \varepsilon_2(\omega), \dots, \varepsilon_N(\omega)] = \tan\delta_N(\omega) \end{cases} \quad (23)$$

借用电阻率反演思路,仍然以NRM为基础对油浸纸相对介电常数进行反演,同时,采用NDM和Broyden法改进NRM的收敛性,提高整个算法的计算精度和效率。由此,相对介电常数的反演迭代公式可由式(18)改写成

$$\varepsilon_{k+1}(\omega) = \lambda B_k^{-1} \times \Delta \tan\delta_k(\omega) + \varepsilon_k(\omega) \quad k=0, 1, 2, \dots \quad (24)$$

式(24)中: $\varepsilon_{k+1}(\omega)$ 和 $\varepsilon_k(\omega)$ 分别为第 $(k+1)$ 次和第 k 次迭代得到的各区域相对介电常数组成的列向量; B_k 为雅各比矩阵的近似矩阵; $\Delta \tan\delta_k(f) = \tan\delta(\omega) - H_k[\varepsilon_k(\omega)]$ 。

3 变压器油浸纸电气参数分区反演仿真

3.1 变压器油纸绝缘二维模型

为说明反演算法的计算过程,文中结合某35 kV变压器油纸绝缘二维轴对称有限元模型对整体反演过程进行演示。建立二维轴对称有限元模型见图2。

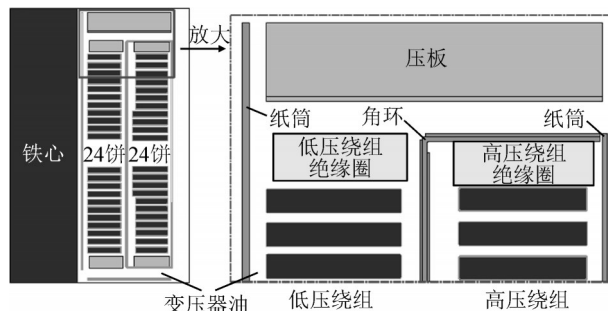


图2 变压器二维轴对称有限元模型

Fig. 2 2-D axisymmetric finite element model of transformer

模型中包含铁心、高压绕组、低压绕组、纸筒、角环、静电环等典型结构,同时考虑了绕组以及静电环外侧包裹的油浸纸。其中,高低压绕组各24饼;绕组外层均包裹绝缘纸,低压绕组外包纸为0.3 mm,高压绕组外包纸为0.4 mm;绝缘纸板设置在高低压绕组之间,低压绕组与铁心之间及高压绕组与箱体之间。

理论上根据变压器测量规程,至少可以采用3种不同的接线方式,测得3组端口 R 和 $\tan\delta$,即:

- 1)高压侧加压,低压侧及箱体接地;
- 2)低压侧加压,高压侧绕组及箱体接地;
- 3)高低压两侧同时加压,箱体接地。

通过这3种接线方式测得的端口参数可反映变压器主绝缘的状态,因此,理论上至少可将变压器内部绝缘纸分为3个区域。不同加压方式下,变压器绝缘结构的电场分布是不同的,且变压器油的电气参数可以通过测量得到,因而式(2)、(22)可改写为式(24)、(25)。其中,H代表高压侧,L代表低压侧,S代表变压器箱体。以 R_{H-LS} 计算为例,仿真计算时,采用有限元恒定电场仿真,高压绕组单元节点施加高电位,低压和箱体单元节点施加0电位,通过提取高压绕组表面节点电流值计算 R_{H-LS} 。计算 $\tan\delta_{H-LS}(\omega)$ 时,采用有限元时谐场仿真,高压绕组单元节点施加高电位,低压和外壳单元节点施加0电位,通过提取高压绕组表面节点电流的实部 I_r 和虚部 I_c 计算 $\tan\delta_{H-LS}=I_c/I_r$ 。

$$\begin{cases} F_1(\rho_1, \rho_2, \rho_3) = R_{H-LS} \\ F_2(\rho_1, \rho_2, \rho_3) = R_{L-HS} \\ F_N(\rho_1, \rho_2, \rho_3) = R_{HL-S} \end{cases} \quad (25)$$

$$\begin{cases} H_1[\varepsilon_1(\omega), \varepsilon_2(\omega), \varepsilon_3(\omega)] = \tan\delta_{H-LS}(\omega) \\ H_2[\varepsilon_1(\omega), \varepsilon_2(\omega), \varepsilon_3(\omega)] = \tan\delta_{L-HS}(\omega) \\ H_3[\varepsilon_1(\omega), \varepsilon_2(\omega), \varepsilon_3(\omega)] = \tan\delta_{HL-S}(\omega) \end{cases} \quad (26)$$

现以图2中二维有限元轴对称模型为例,展示反演算法的计算流程。首先将变压器内部纸绝缘按照主绝缘结构分为低压绕组与铁心之间的纸绝缘、高低压绕组间的纸绝缘以及高压绕组与箱体外壳之间的纸绝缘3个区域,见图3。

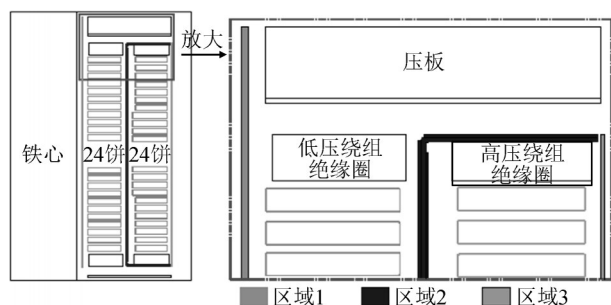


图3 变压器油纸绝缘分区图

Fig. 3 The division of oil-paper in transformer

3.2 二维模型油浸纸电气参数分区反演

3.2.1 油浸纸电阻率分区反演

文中将3个不同区域的油浸纸电阻率实际值设置为: $\rho_1=1 \times 10^{14} \Omega \cdot m$; $\rho_2=5 \times 10^{13} \Omega \cdot m$; $\rho_3=1 \times 10^{13} \Omega \cdot m$,代表3种不同区域的绝缘状态,油的电阻率设为 $1 \times 10^{12} \Omega \cdot m$ 。此时,在3种不同接线方式下,通过有限元恒定电场仿真正演计算得到的变压器绝缘电阻 R 见表1,并将其视为实际测量得到的 R 输入反演算法中,由于变压器油电阻率实际中可测量,在反演时中也将其视为已知量 $1 \times 10^{12} \Omega \cdot m$ 。同时,将迭代终止误差 σ 设置为0.1%。电阻率上下限设置为 $[1 \times 10^{11}, 1 \times 10^{16}]$ 。

表1 仿真所得实际整体 R

Table 1 The actual whole R from simulation Ω

参数	数值
R_{H-LS}	2.159×10^{10}
R_{L-HS}	9.916×10^{10}
R_{HL-S}	2.163×10^{10}

将3区域油浸纸电阻率初值设置为 $1 \times 10^{13} \Omega \cdot m$,分别采用NRM和NDM-Broyden法对电阻率进行反演。迭代过程见图4(图中以“NBM”表示NDM-Broyden法)。

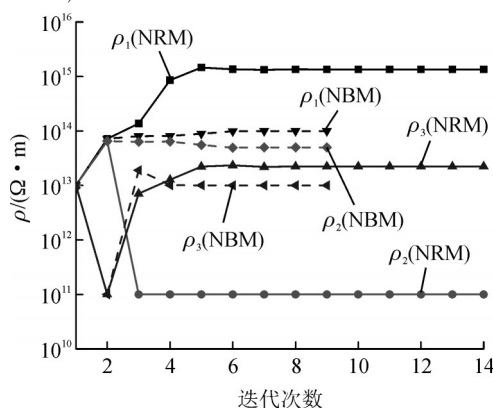


图4 基于NRM和NDM-Broyden法的电阻率迭代过程

Fig. 4 Resistivity iteration process based on NRM and NDM-Broyden method

从图4可知,采用NRM进行反演的3区域电阻率迭代曲线呈现发散状态,其中区域2的电阻率不断被下限修正,这主要是由于初值选择不当的原因^[12];而采用NDM-Broyden法3区域的电阻率在迭代了9步后均收敛。两种算法反演的最终结果见表2,可知采用NDM-Broyden法得到的电阻率反演值与预设值完全吻合。

表2 电阻率反演结果

Table 2 Inversion results of ρ

电阻率/ ($\Omega \cdot m$)	预设值	NRM反演值	NDM-Broyden法反 演值
ρ_1	1×10^{14}	$1.347\ 51 \times 10^{15}$	$9.999\ 97 \times 10^{13}$
ρ_2	5×10^{13}	$1.000\ 00 \times 10^{11}$	$4.999\ 96 \times 10^{13}$
ρ_3	1×10^{13}	$2.234\ 40 \times 10^{13}$	$1.000\ 00 \times 10^{13}$

3.2.2 油浸纸相对介电常数分区反演

油纸绝缘不同区域仍按照图2所示划分。文中将3个不同区域的油浸纸相对介电常数实际值设置为: $\varepsilon_1(10^{-4} \text{ Hz})=25$; $\varepsilon_2(10^{-4} \text{ Hz})=30$; $\varepsilon_3(10^{-4} \text{ Hz})=35$ 。电阻率为3.2.1节反演所得,计算频率为 10^{-4} Hz 。此时,采用3种不同接线方式,通过有限元时谐场仿真得到的变压器 $\tan\delta(10^{-4} \text{ Hz})$ 见表3,并将其视为实际测量得到的 $\tan\delta(10^{-4} \text{ Hz})$,和3.2.1节反演得到的电阻率值一并输入反演算法中。反演时,迭代终止误

差 $\sigma=0.1\%$;相对介电常数上下限值为 $[1, 60]$;油电阻率、相对介电常数由于可测,被设为 $1\times 10^{12}\ \Omega\cdot\text{m}$ 和2.2。

表3 仿真所得实际整体 $\tan\delta$ ($10^{-4}\ \text{Hz}$)

Table 3 The actual whole $\tan\delta$ ($10^{-4}\ \text{Hz}$) from simulation

参数	数值
$\tan\delta_{\text{H-L}}$	1.644
$\tan\delta_{\text{L-H}}$	1.108
$\tan\delta_{\text{H-L-S}}$	1.954

将3区域油浸纸相对介电常数初值设置为40,分别采用NRM和NDM-Broyden法对相对介电常数进行反演。迭代过程见图5。

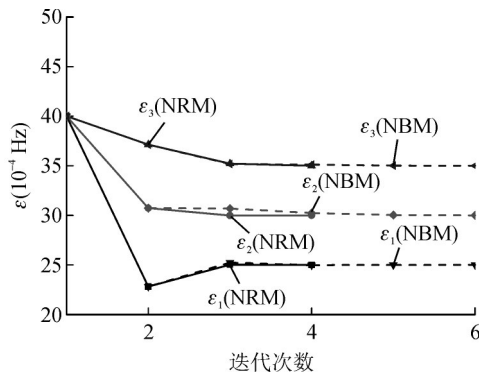


图5 基于NRM和NDM-Broyden法的相对介电常数迭代过程

Fig. 5 Relative permittivity iteration process based on NRM and NDM-Broyden method

由图5可知,基于NRM和NDM-Broyden法的3区域相对介电常数在迭代了4和6步后均收敛至实际预设值,最终的反演结果见表4。由于相对介电常数的变化范围较电阻率小,故并没有出现初值选择不当导致反演结果发散的现象。而尽管NRM的迭代步数比NDM-Broyden法少,但根据式(19)、(20)可知,NRM和NDM-Broyden法的有限元计算次数分别为39和27,说明NDM-Broyden法提升了30.77%的计算效率。

表4 相对介电常数反演结果

Table 4 Inversion results of ϵ

相对介电常数	预设值	NRM反演值	NDM-Broyden法反演值
ϵ_1	25	25.000 80	24.999 96
ϵ_2	30	29.999 34	30.000 23
ϵ_3	35	35.011 08	35.000 05

综上,改进后的NDM-Broyden法较NRM对初值的依赖小,且有效改善了NRM的收敛情况并提升了计算效率。

4 XY模型验证

4.1 XY模型

油浸式变压器的主绝缘结构可以等效成XY模型,见图6。文中将不同老化和受潮状态的油浸纸板组成不同的XY模型,采用上述反演方法对其电阻率和低频相对介电常数进行反演计算。

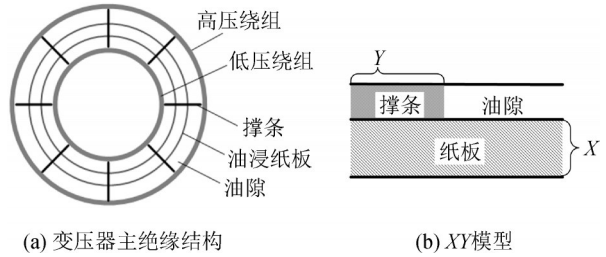


图6 变压器主绝缘及XY模型

Fig. 6 Transformer main insulation structure and XY model

文中采用纸板—圆环—纸板的结构构建XY模型,见图7。将测量样品按照纸板—圆环—纸板的顺序依次放入三电极中,试验布置和三电极尺寸见图8。试验共采用3张未知电气参数的1 mm纸板(记为 P_1 、 P_2 、 P_3)和1张圆环纸板(记为 R_1)。其中 P_1 、 R_1 为干燥新油浸纸板, P_2 为在140℃、氮气条件下老化20 d后的干燥样品; P_3 为 P_2 在70%/25℃下自然吸湿8 h左右的老化受潮样品; R_1 由于被剪裁无法测量,其电气参数取其同一批样本的平均值。

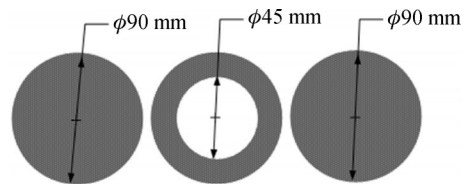


图7 试验用纸板和圆环

Fig. 7 Paperboards and ring used in test

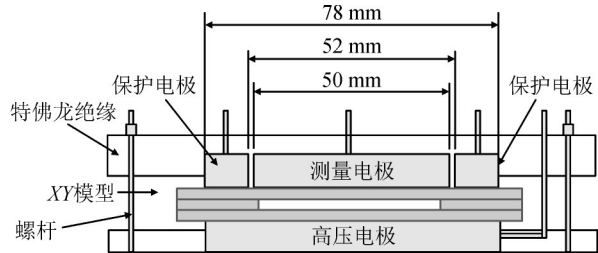


图8 XY模型试验布置

Fig. 8 Experimental setup of XY model

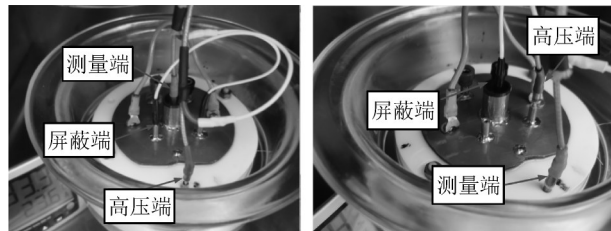
将这些样本分为两组组成XY模型,第一组由下到上为 P_1 、 R_1 、 P_2 ,第二组由下到上为 P_1 、 R_1 、 P_3 ,其中 R_1 的电气参数经测量已知, ρ 和 $\epsilon(10^{-4}\ \text{Hz})$ 分别是 $1.28\times 10^{14}\ \Omega\cdot\text{m}$ 、4.33。将每组XY模型的上纸板定义为未知参数区域1,下纸板定义为未知参数区域2,

即反演 P_1 、 P_2 、 P_3 的电气参数。由于每组 XY 模型有两个区域需要反演,因而采用两种接线方式分别测量 R 和 $\tan\delta(10^{-4} \text{ Hz})$,接线方式见表 5,接线实物图见图 9。采用两种接线方式分别对两组 XY 模型进行极化电流和介电频谱的测量,极化电流通过 Keithly 6514 测量,测量时间 10 000 s,取末端时刻对应的极化电流值计算绝缘电阻;介电频谱通过 IDAX300 测量,取 10^{-4} Hz 对应的介损值;测量变压器油的电阻率和介电频谱时,采用 IEC 60247:2004 推荐的三电极油杯作为测量电极,测量结果见表 6。测量温度 23°C ,极化电流测量电压为 200 V, FDS 测量电压有效值为 140 V。

表 5 XY 模型端口参数测量接线方式

Table 5 The wiring mode of XY model port parameters

接线方式	加压端	测量端	屏蔽端
1	高压电极	低压电极	保护电极
2	保护电极	高压电极	低压电极



(a) 接线方式1

(b) 接线方式2

图 9 两种接线方式

Fig. 9 Two wiring mode

表 6 反演输入量测量结果

Table 6 Inversion input measured results

XY 模型	接线方式	R/Ω	$\tan\delta(10^{-4} \text{ Hz})$	$\rho_{oil}/(\Omega\cdot\text{m})$	$\varepsilon_{oil}(10^{-4} \text{ Hz})$
1	1	9.90×10^{13}	0.53	5.69×10^{12}	3.78
	2	2.50×10^{13}	1.26		
2	1	5.81×10^{13}	0.61	2.01×10^{12}	7.60
	2	1.03×10^{13}	2.26		

结束测量后,对 P_1 、 P_2 、 P_3 的极化电流和介电频谱进行测量,其 ρ 和 $\varepsilon(10^{-4} \text{ Hz})$ 通过式(27)、(28)计算:

$$\rho = \frac{U}{I_{\text{pol}}} \frac{S}{d} \quad (27)$$

$$\varepsilon(\omega) = \frac{C(\omega)d}{\varepsilon_0 S} \quad (28)$$

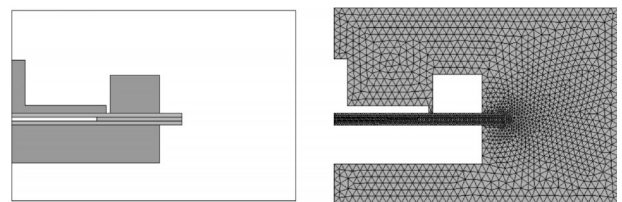
式(27)、(28)中: ρ 为固体体积电阻率, $\Omega\cdot\text{m}$; I_{pol} 为极化电流, A; U 为外施直流电压; $S=\pi(D_1+g)^2/4$ 为测量电极的有效面积, m^2 ; $g=0.001 \text{ m}$ 为测量电极和保

护电极之间的间隙; $D_1=0.05 \text{ m}$ 为测量电极直径; d 为试样的厚度, m; $\varepsilon(\omega)$ 为相对介电常数; $\varepsilon_0=8.85\times 10^{-12} \text{ F/m}$ 为真空介电常数; $C(\omega)$ 为测量电容。

4.2 XY 模型反演

4.2.1 反演模型

据图 8 中试验布置建立二维轴对称有限元模型见图 10(a),模型的建模和剖分分别见图 10。由于电极金属不参与计算,为节省网格故没有剖分。对 XY 模型进行了密集剖分,网格尺寸为 0.5 mm 见图 10(b);三电极由绝缘油包裹,剖分尺寸为 2 mm ,存放绝缘油的玻璃容器宽 50 mm ,高 75 mm 。



(a) XY模型有限元建模

(b) XY模型剖分

图 10 XY 模型建模和剖分

Fig. 10 Modeling and mesh of XY model

4.2.2 反演结果和分析

首先对 XY 模型 1 进行反演,以表 6 中的端口可测量和油的电气参数作为输入,采用 NDM-Broyden 法对 P_1 和 P_2 的电气参数进行反演,由于 P_1 为干燥的新纸板,将其电阻率和相对介电常数初值设置为 $1\times 10^{14} \Omega\cdot\text{m}$ 和 4, P_2 由于是老化后的纸板,将其电阻率初值设置为 $1\times 10^{13} \Omega\cdot\text{m}$ 。由于老化对相对介电常数影响小,故 P_2 的相对介电常数初值设置为 4。其余参数设置与 3.2 节相同,电气参数反演迭代的结果见图 11。需要说明的是,对于实际反演问题,迭代终止的条件为:当连续数次迭代的反演结果或误差范数的相对误差小于终止误差时,立即停止迭代。

进一步反演 XY 模型 2 的上下纸板电气参数, P_1 参数初值设置与 XY 模型 1 相同,由于 P_3 是由 P_2 吸湿获得,故将 P_2 的参数反演结果作为 P_3 的参数反演初值。其余参数设置与 3.2 节相同,电气参数反演迭代的结果见图 12。

两组 XY 模型的电气参数反演结果见表 7,误差的主要来源有两方面,首先是仿真模型和实际模型的误差,有限元建模中,纸板的圆心与高压电极圆心是对齐的,但在放置 XY 模型时可能使得圆心间有些偏差;其次是端口参数的测量误差,即由于输入

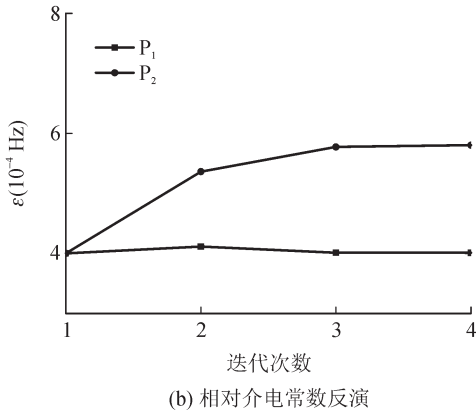
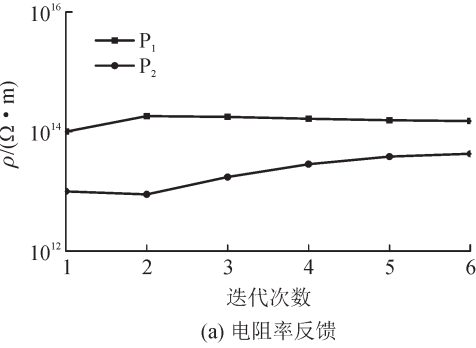


图 11 XY模型1的反演结果

Fig. 11 Inversion result of XY model 1

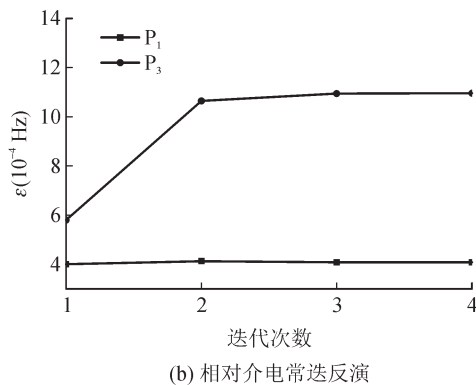
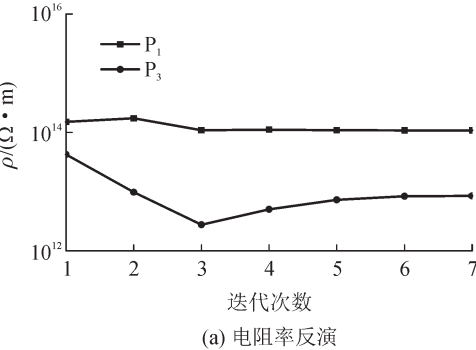


图 12 XY模型2的反演结果

Fig. 12 Inversion result of XY model 2

存在的测量误差导致反演的结果出现误差。但仍可以通过反演结果判断出老化和未老化油浸纸板在电气参数上的差别,可证明整套电气参数的反演方法初步可行。

表 7 XY模型反演与实测结果比较

Table 7 Comparison inversion results with measured results of XY model

XY模型	纸板	ε 实测值/反演值	ρ 实测值/反演值/($\Omega\cdot\text{m}$)
1	P ₁	4.16/4.01	$1.47\times10^{14}/1.51\times10^{14}$
	P ₂	6.67/5.80	$4.33\times10^{13}/4.25\times10^{13}$
2	P ₁	4.16/4.09	$1.47\times10^{14}/1.08\times10^{14}$
	P ₃	13.70/10.96	$9.90\times10^{12}/8.47\times10^{12}$

5 结论

文中通过对变压器油浸纸电气参数电阻率 ρ 和 10^{-4} Hz下相对介电常数 $\varepsilon(10^{-4}$ Hz)分区反演检测方法可行性进行研究,得出以下结论:

1)为考虑变压器内部绝缘劣化位置的空间分散性,通过有限元仿真搭建变压器二维模型,建立各区域油浸纸电气参数和端口可测量之间的非线性映射关系,采用NDM-Broyden对油浸纸电气参数进行迭代逆求解,实现了多维迭代,仿真结果显示在 ρ 反演中,NRM由于初值选择不当而结果发散,NDM-Broyden法对初值的依赖小,有效改善了NRM的收敛情况,反演值与预设值完全吻合;在 $\varepsilon(10^{-4}$ Hz)反演中,由于 $\varepsilon(10^{-4}$ Hz)变化范围较 ρ 小,两种方法均收敛,但NDM-Broyden法提升了30.77%计算效率。

2)借助电阻率反演思想,形成一整套完整的油浸纸电气参数反演方法:即首先建立起变压器油纸绝缘有限元模型并划分 N 个区域,设置各区域油浸纸电阻率初值 ρ_0 ;将测量得到的 N 个端口绝缘电阻和油电阻率一并代入变压器油浸纸电阻率分区反演模型中,反演得到各区域油浸纸电阻率 ρ ;设置各区域油浸纸相对介电常数初值 ε_0 ,将反演得到的 ρ 视为已知量,与测量得到的 N 个端口介质损耗因数和油电气参数一并代入变压器油浸纸相对介电常数分区反演模型中,反演得到各区域油浸纸相对介电常数 $\varepsilon(10^{-4}$ Hz)。

3)将XY模型中的上下油浸纸板划分为2个未知区域,测量其端口输入量后,采用NDM-Broyden法对未知区域电气参数进行反演,将反演结果与实测值进行对比,可以初步判断出老化和未老化油浸纸板在电气参数上的差别,证明整套反演方法初步可行。

文中所提出的变压器油浸纸电气参数分区反演方法经过XY模型验证,初步实现了对油纸绝缘局部油浸纸电气参数的反演计算,后续可试验建立油

浸纸 ρ 、 $\varepsilon(10^{-4}$ Hz)及其表征的聚合度、含水量的训练样本集,采用智能分类算法建立基于 ρ - ε 的油浸纸聚合度—含水量状态辨识模型。同时建立变压器样机,针对其不同区域进行加速热老化,采用文中方法对其不同区域油浸纸的绝缘状态进行评估。另外,还将结合电气参数与温度之间的关系,消除温度的影响,进一步提升方法的实用性。

参考文献:

- [1] 廖瑞金,杨丽君,郑含博,等.电力变压器油纸绝缘热老化研究综述[J]. 电工技术学报,2012,27(5):1-12.
LIAO Ruijin, YANG Lijun, ZHENG Hanbo, et al. Reviews on oil-paper insulation thermal aging in power transformers [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5):1-12.
- [2] CIGRE Working Group A2.37. Transformer reliability survey[R]. Paris: CIGRE, 2015.
- [3] 舒 恺,高飞翎,余萃卓,等.一种基于未确知测度理论的油纸绝缘老化评估方法[J]. 高压电器,2022,58(11):128-137.
SHU Kai, GAO Feiling, YU Cuizhuo, et al. Assessment method of oil-paper insulation aging based on uncertain measurement theory[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(11):128-137.
- [4] 吴广宁,宋臻杰,俞孝峰,等.基于修正Debye模型的油浸绝缘纸不均匀老化时域介电特性[J]. 高电压技术,2018,44(4):1239-1246.
WU Guangning, SONG Zhenjie, YU Xiaofeng, et al. Time domain dielectric properties of oil-impregnated paper with non-uniform aging based on modified Debye model[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(4):1239-1246.
- [5] FARAHANI M, BORSI H, GOCKENBACH E. Dielectric response studies on insulating system of high voltage rotating machines[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2006, 13(2):383-393.
- [6] 董 明,王 丽,吴雪舟,等.油纸绝缘介电响应检测技术研究现状与发展[J]. 高电压技术,2016,42(4):1179-1189.
DONG Ming, WANG Li, WU Xuezhou, et al. Status and progress in study of dielectric response technology for oil-paper insulation[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(4):1179-1189.
- [7] VERMA H C, BARAL A, PRADHAN A K, et al. Condition assessment of various regions within non-uniformly aged cellulosic insulation of power transformer using modified Debye model[J]. IET Science Measurement & Technology, 2017, 11(7):939-947.
- [8] RUAN Jiangjun, JIN Shuo, DU Zhiye, et al. Condition assessment of paper insulation in oil-immersed power transformers based on the iterative inversion of resistivity[J]. Energies, 2017(10):509-524.
- [9] RUAN Jiangjun, XIE Yiming, JIN Shuo, et al. Inversion of oil-immersed paper resistivity in transformer based on dielectric loss factor[J]. IEEE Access, 2019(7):44050-44058.
- [10] 金 硕,朱 琳,杨 帅,等.基于SVR的变压器油浸纸电阻率分区间接检测方法[J]. 高电压技术,2021,47(3):1020-1027.
JIN Shuo, ZHU Lin, YANG Shuai, et al. Multiregion indirect detection method for resistivity of oil-impregnated paper in power transformer based on SVR[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(3):1020-1027.
- [11] XIE Yiming, RUAN Jiangjun, SHI Yu, et al. Inversion detection method for resistivity of oil-immersed paper in transformer[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(4):1757-1765.
- [12] XIE Yiming, RUAN Jiangjun, HUANG Daochun, et al. Improved inversion method for multi-regional oil-immersed paper resistivity in transformer[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(3):1467-1475.
- [13] XIE Yiming, RUAN Jiangjun, DU Zhiye, et al. Calculation of moisture content of Oil-Immersed paperboard based on 10^{-4} Hz relative permittivity[C]//2021 International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE). China: IEEE, 2021:1-4.
- [14] 姚 姚.蒙特卡洛非线性反演方法及应用[M]. 北京:冶金工业出版社,1997:1-10.
YAO Yao. Monte Carlo nonlinear inversion method and application[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1997:1-10.
- [15] KRAUSE C. Power transformer insulation - history, technology and design[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(6):1941-1947.
- [16] 张欲晓,李胜利,王梦君,等.变压器绝缘纸的聚合度变化规律[J]. 高电压技术,2011,37(10):2458-2463.
ZHANG Yuxiao, LI Shengli, WANG Mengjun, et al. Degree of polymerization of insulation paper in the transformer[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(10):2458-2463.
- [17] 王世强,张冠军,魏建林,等.纸板的老化状态对其PDC

- 特性影响的实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(34): 177-183.
- WANG Shiqiang, ZHANG Guanjun, WEI Jianlin, et al. Experimental study of the aged states effects on pressboard PDC characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(34): 177-183.
- [18] 韩慧慧, 杨道武, 王 溯, 等. 变压器油纸绝缘体积电阻率与酸值及聚合度的相关性研究[J]. 变压器, 2010, 47(6): 32-36.
- HAN Huihui, YANG Daowu, WANG Shuo, et al. Research on correlation of insulation volume resistivity with acid value and polymerization degree of transformer oil and paper [J]. Transformer, 2010, 47(6): 32-36.
- [19] 齐超亮. 变压器油纸绝缘的修正 Cole-Cole 模型频域介电特征提取及特性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- QI Chaoliang. Extraction method of frequency domain dielectric characteristic parameters based on modified Cole-Cole model of oil-paper in transformer and their properties [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [20] 周利军, 李先浪, 王东阳, 等. 不均匀老化油纸绝缘稳态水分分布的频域介电谱[J]. 高电压技术, 2015(6): 1951-1958.
- ZHOU Lijun, LI Xialang, WANG Dongyang, et al. Frequency domain dielectric spectroscopy of non-uniform aging oil-paper with equilibrium moisture distribution[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(6): 1951-1958.
- [21] JADAV R, EKANAYAK C, SAHA T K. Understanding the impact of moisture and ageing of transformer insulation on frequency domain spectroscopy[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(1): 369-379.
- 谢一鸣(1993—), 男, 博士, 工程师, 主要从事电磁场仿真分析、特高压直流输电、设备状态评估等方面的研究工作 (E-mail: xieyiming@whu.edu.cn)。
- 金 硕(1988—), 男, 博士, 讲师, 主要从事电工装备电磁多物理场仿真分析、电气设备绝缘状态评估等方面的研究工作。